我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障

徐建明* 孟 俊 刘杏梅 施加春 唐先进

浙江大学环境与资源学院 杭州 310058

摘要 我国农田土壤重金属污染形势严峻，已对粮食安全构成威胁。文章针对我国农田土壤和粮食作物重金属超标现状，强调把粮食作物区域划分为禁产、限产和宜产3种类型；通过采用重金属低积累粮食作物品种、重金属钝化与阻隔技术及农艺管理等措施，实现中轻度重金属污染农田的安全利用，为粮食安全生产提供技术保障；并明确提出了重金属动态监测、低积累作物品种资源库、钝化剂市场准入、超标农田的轮作休耕、高重金属含量秸秆的处置、粮食安全生产保障体系与政策等是今后我国农田土壤安全利用的关键环节。

关键词 农田土壤，重金属污染，粮食安全，策略

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2018.02.004

土壤是人类赖以生存和发展的基石，是保障粮食安全生产的重要物质基础。2014年4月17日的《全国土壤污染状况调查公报》显示，我国耕地土壤重金属等污染物点位超标率达19.4%，污染形势不容乐观。土壤重金属超标带来的水稻、小麦等粮食作物重金属超标问题也令人担忧[1]。因此，土壤重金属污染防治与修复工作亟待加强。近年来，党中央和国务院高度重视土壤重金属污染防治与粮食安全生产，明确将“保护耕地资源，防治耕地重金属污染”作为《全国农业可持续发展规划（2015—2030年）》的重点任务；国务院2016年5月28日印发《土壤污染防治行动计划》（简称“土十条”），对今后一个时期我国土壤污染防治工作做出了全面战略部署；党的十九大报告中提出要“强化土壤污染管控与修复，加强农业面源污染防治”“确保国家粮食安全”等。然而，如何修复农田土壤重金属污染，保障粮食作物安全生产，是当前土壤及环境领域的研究热点和难点。本文通过检索国内外相关文献资料，并基于我们近年来的研究和认识，全面分析了我国农田土壤与粮食作物重金属污染状况及二者之间的关系，探讨了中轻度重金属污染农田土壤修复技术与方法，针对性地提出了我国农田土壤安全利用的关键环节与策略，以期为重金属超标农田的粮食安全生产提供参考。

* 通讯作者
资助项目：国家自然科学基金创新研究群体项目（41721001），国家现代农业产业技术体系项目，浙江省科技厅重点研发项目（2018C03028）
修改稿收到日期：2018年1月25日

1 我国农田土壤与粮食作物的重金属超标现状

1.1 农田土壤重金属超标状况

在国家及地方系列项目的支持下，针对我国不同区域重金属超标状况调查的零星研究较多，大多数集中于工矿区和冶炼企业周边地区、城郊农田等，而对我国粮食主产区耕地土壤重金属状况的调查和分析相对较少，造成我国部分地区土壤重金属污染程度评估过高或过低，偏离实际情况，因此亟须尽快摸清土壤污染“家底”。尽管目前国家有关部门对我国农田土壤重金属超标状况调查结果不尽一致，但整体数据仍然可以说明当前我国土壤污染的总体形势不容乐观，其中以西南、中南、长江三角洲及珠江三角洲等地区污染最为突出[2]。

环境保护部对我国 30 万公顷基本农田保护区土壤中有害重金属的抽查结果发现，土壤重金属点位超标率达 12.1%[3]；2014 年环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，我国耕地土壤点位超标率达 19.4%，主要污染物为镉（Cd）、镍（Ni）、铜（Cu）、砷（As）、汞（Hg）、铅（Pb）、滴滴涕和多环芳烃。而农业部对我国 140 万公顷污水灌溉区域调查发现，土壤重金属超标面积占 64.8%[4]。

此外，不同研究尺度下我国农田土壤重金属超标元素存在明显差异，且农田土壤 Cd 元素发生污染的概率最高[4]。如环境保护部调查发现，长江三角洲地区土壤重金属主要超标元素为 Cd、Cu、Pb 和 Zn，其超标率分别为 5.64%、2.73%、0.75% 和1.13%；江苏省耕作层土壤重金属主要超标元素也是 Cd、Cu、Pb 和 Zn，超标面积分别占 15.91%、12.55%、7.63% 和 9.63%[5]；浙江省某地土壤重金属 Cd、Cu 和 Zn 的超标率分别为 40%、64% 和 12%；我国东北平原、长江流域和东南沿海地区水稻土 Cd 平均浓度分别为 0.19、0.26 和 0.21 mg/kg；全国 22 个水稻种植省份土壤 Cd 的平均含量为 0.45 mg/kg，其中湖南水稻土 Cd 平均含量最高为 1.12 mg/kg[6]。

粮食产区土壤重金属累积超标多数是由于污水灌溉、大气沉降以及使用重金属含量较高的磷肥、畜禽粪便、污泥等造成的[7-9]。根据我们对长江中下游某地污染较严重的 4.4 万亩农田土壤重金属的调查结果，并参照《全国土壤污染状况评价技术规定》，显示主要超标元素为 Cd 和 Cu。通过空间分析和区域统计识别，发现该地区土壤重金属 Cd 的轻微、中轻度和重度污染面积分别占到 45.62%、12.3% 和 1.74%。

总体来说，我国农田土壤重金属超标状况堪忧，在土壤重金属污染程度和面积尚未清楚的情况下，开展土壤污染详查尤为重要，目前该项工作正在进行之中。

1.2 粮食作物重金属超标问题

近年来，我国重金属污染事件频发，“镉米”“镉麦”等事件的曝光，引起了全社会对水稻、小麦等主要粮食作物重金属超标问题的广泛关注。据报道，全国每年仅因重金属污染而减产的粮食达 1 000 多万吨，被重金属污染的粮食也多达 1 200 万吨，合计损失至少 200 亿元人民币①。

水稻是我国种植面积最大、单产最高的粮食作物，也是对重金属吸收最强的大宗谷类作物。镉作为对人体危害性最强的重金属元素之一，加上多数稻米对镉具有超富集能力，使其成为影响稻米质量安全的重要限制性因素。农业部稻米及制品质量监督检验测试中心对我国部分地区稻米质量安全普查结果表明，约有 10% 的稻米中 Cd 含量超过《食品中镉限量卫生标准》（GB15201294）限定标准值 0.2 mg/kg；我们通过对长江中下游某县级市农田土壤-水稻系统中重金属近 10 年来的定位监测，发现 2006、2011 和 2016 年采集的稻米中 Cd 的点位超标率分别为 9.3%、22.2% 和 20.7%，10 年间稻米 Cd 超标率显著增加。除镉污染外，稻米中重金

① 中国科学院学部 . 我国土壤重金属污染问题与治理对策 . 2013.

属Pb、Hg和As元素含量超标现象也时有发生[8,10]。

近年来，有关我国小麦重金属超标的报道也逐渐增多，陆美斌等[11]在中国黄淮海平原和长江中下游平原两大优势产区的8个省（市）采集的393份小麦籽粒中Cd的超标率分别为0.7%和9.0%；陈京都等[12]发现江苏省某典型区农田小麦籽粒中Pb、铬（Cr）、Hg、Ni和As样品超标率分别为100%、58.97%、33.33%、10.26%和2.56%，而Cu、Zn和Cd未超标；强承魁等[13]发现高速公路两侧、污灌区以及污泥施用区等农田土壤种植小麦中部分重金属元素超标较严重。

目前，有关粗粮类、豆类、木薯、番薯和马铃薯等粮食作物中重金属污染多见于实验室和小区研究。区域尺度下针对这些粮食作物重金属超标状况报道较少，有待开展进一步的研究。

1.3 土壤与粮食作物重金属之间的关系

农田土壤生态系统中，土壤重金属的积累与粮食作物吸收之间的关系复杂多样。具体而言，粮食作物中重金属含量受产地环境重金属污染水平、土壤性质、气候、作物品种和种植管理水平等诸多因素影响。目前，大多数相关研究局限在盆栽试验或田间小区尺度，控制条件与大田实际产地环境和生产操作存在较大的差异。由于缺乏大数据量以及多变量的监测与分析，难以对全国土壤污染状况调查结果与粮食作物重金属超标之间进行统计学上的相关性分析，尤其是二者的空间对应定量关系尚不清楚。土壤污染评价结果与粮食作物污染评价结果可能一致，也可能存在土壤重金属超标而对应作物中重金属不超标，或者土壤重金属不超标而生长的作物中重金属超标的现象[5,14]。而当前，学界对土壤污染问题关注较多，但对土壤-粮食作物系统重金属污染及二者之间的定量化关系研究相对较少。

我们前期对长江中下游某县级市稻米及其对应土壤中的重金属分析发现，稻米Cd与土壤总Cd含量呈显著正相关。而对另一地点土壤及早稻（中早39）中重金属调查结果则显示，土壤As不超标，但对应的稻米中As超标率达18.9%，统计结果分析表明稻米As含量与土壤中As的总量和有效态含量相关性均不显著。

因此，需要明晰土壤重金属形态与粮食作物吸收的耦合机理，厘清影响不同粮食作物对重金属吸收的土壤关键因子以及驱动机制，并在此基础上研发农田土壤重金属污染防控技术，为我国重金属污染农田土壤的安全利用提供决策支撑。

2 重金属超标农田安全生产保障技术

2.1 粮食作物禁产、限产和宜产农田的划分

科学合理的规划是农田土壤安全利用和粮食安全生产保障的重要手段。对于重度污染农田土壤，禁止从事粮食作物生产，并制定相应的污染土壤修复计划与实施方案；对于中轻度污染农田土壤，合理布局粮食作物，避免粮食可食部分重金属超标，实现污染农田的安全利用；对于清洁农田土壤，加强监控，维持其正常粮食生产功能。

因此，从农产品安全角度，将农田土壤划分为禁产、限产和宜产区域，可为重金属超标农田土壤的安全生产提供保障。

2.2 重金属低积累粮食作物品种的筛选

不同作物和同一作物不同品种或基因型，在对重金属的吸收和积累上存在很大差异。目前，国内外对重金属低积累粮食作物品种的筛选已有较多的报道，但这些作物对重金属低积累的机制还不明确。当前实施的“十三五”国家重点研发计划“七大农作物育种”重点专项和现代农业产业技术体系项目，都有涉及该方面的研究内容。

蒋彬等[15]研究发现，239份常规稻水稻品种对Cd、Pb和As的累积量存在极显著的基因型差异，并筛选出了一系列重金属低积累的水稻品种。秀水519和甬优538是2种低Cd和低As积累的水稻品种。水稻对重金属的低积累特性与其重金属耐性基因相关，如有研究发现水稻Cd抗性基因*OsPCR*1和调控基因表达的小分子

*miR*166 与籽粒 Cd 积累密切相关[16,17]。而有关小麦和玉米重金属低积累品种的筛选工作，当前还鲜有报道。因此，需要深入挖掘粮食等作物的遗传基因，筛选并培育对重金属具有低积累的作物品种，发挥作物自身对重金属迁移的“过滤”和“屏障”作用，保障中轻度重金属污染农田土壤粮食的安全生产。

2.3 重金属钝化阻隔技术的研发

钝化阻隔技术是指向重金属污染土壤中添加一种或多种钝化材料，包括无机、有机、微生物、复合等钝化剂，通过改变土壤中重金属的形态和降低重金属活性，从而减少粮食作物对重金属的吸收，以达到污染土壤安全利用的目的。

常用的无机钝化剂主要包括含磷材料、钙硅材料、黏土矿物及金属氧化物等，这类钝化剂在重金属污染土壤中的应用最为广泛，主要通过吸附、固定等反应降低重金属的有效性。有机钝化剂主要有秸秆、畜禽粪便、堆肥和城市污泥等，有机物料通过对重金属的络合作用降低其有效性。微生物钝化剂是一些能改变土壤重金属价态和吸附固定重金属的微生物，目前报道的有硫酸盐还原菌和革兰氏阴性细菌等，但这方面的工作大多集中于机理研究，涉及应用的研究还较少[18]。

由于不同钝化剂对不同类型重金属的钝化效果存在一定的差异，并且土壤重金属污染常常是复合污染，单靠一种钝化修复产品难达到预期效果，因此复合钝化剂的研发和应用是农田污染土壤安全利用的重要发展方向。

此外，新型钝化剂如生物质炭和纳米材料的研发备受关注，如生物质炭可通过离子交换、表面络合和吸附沉淀等作用来降低重金属生物有效性[19,20]；纳米羟基磷灰石可通过吸附固定作用显著降低土壤中重金属的有效性，且钝化效果好[21,22]。但是，这些钝化材料生产成本较高，可能也存在一定的环境风险，因此亟须研发低廉、高效、环境友好的土壤重金属污染新型钝化产品。

2.4 重金属农艺调控措施的发挥

农艺措施能够有效调控作物对重金属的吸收，主要包括种植重金属低积累作物、调节土壤理化性状、科学管理水分和施用功能性肥料等。对于轻度重金属污染农田土壤，淹水处理是一种较好的降低稻米 Cd 含量的农艺措施。与常规水分处理相比，淹水条件下稻米 Cd 含量下降 3.6%—26.3%。

对于中轻度污染稻田，结合水分管理与增施钙镁磷肥等措施可显著降低土壤有效态 Cd 含量和稻米对 Cd 的积累。

在重度污染区，则选择种植油菜、花生和甘蔗等低 Cd 积累作物替代水稻，如此可达到安全利用的目的。也可改种棉花、红麻、苎麻和蚕桑等纤维植物，阻断土壤 Cd 进入食物链[23]。

3 重金属超标农田安全利用关键环节与策略

3.1 农田重金属动态监测

国外针对大尺度污染状况调查、成因分析方面的工作较多，并建立了诸多长期动态监测系统。我国也开展了多次大面积污染调查工作，并正在开展土壤污染详查工作，但尚缺乏基于历史大数据和源解析技术的权威性农田土壤和粮食作物的污染源清单，土壤和粮食作物重金属含量的综合分析以及模型模拟方面的工作也有待加强。

2006 年，环境保护部与国土资源部组织各地环境监测站采用 GPS 定位、网格化采样方式对全国土壤污染进行调查，共采集土壤、农产品等样品 213 754 个，获得有效调查数据 495 万个，初步建立了全国土壤污染状况调查数据库和样品库。2017 年，我国新一轮土壤污染状况详查全面启动，已确定 2 万个左右国控点位布设，覆盖我国 99% 的县、98% 的土壤类型和 88% 的粮食主产区，初步建成了国家土壤环境监测网。通过粮食主产区土壤及农产品的协同监测，建立农田土壤和粮食作物重金属监测大数据平台，可以为污染土壤的分区分类管控、安

全利用及修复提供科学依据。

3.2 重金属低积累作物品种资源库

不同作物类型和品种基因型，在吸收、积累重金属方面的能力存在较大差异。目前，有关低吸收水稻等作物品种的筛选研究工作较多，研究表明通过筛选低积累品种来减少作物对重金属的吸收富集是完全可行的。

由于粮食作物品种的区域特色十分明显，当前亟须建立针对不同种植区域、不同重金属元素、不同作物类型的重金属低积累品种资源库，并分类制订其栽培调控措施和田间应用规范，力保在服务农田安全利用的同时又达到高产的双赢目标。

3.3 钝化剂的市场准入

目前，市场上钝化剂类型繁多，而人们对钝化剂本身存在的无机及有机污染物或有害病原微生物等的关注却比较少。钝化剂成分复杂，如来自污泥、畜禽粪便、工业废弃物等原材料制备的生物质炭，其本身重金属含量就较高，在用于农田土壤重金属钝化修复过程中可能会造成二次污染和土壤质量退化等问题。

因此，需要明确钝化剂的使用量、使用时期和适宜区域，制定土壤重金属钝化材料的产品标准，建立农田土壤重金属钝化剂的市场准入制度，杜绝可能造成二次污染风险的钝化剂进入农田生态系统，这是正确应用钝化剂修复重金属污染土壤的前提和保障。

3.4 重金属超标农田的轮作休耕

由于对耕地资源的长期过度利用，我国部分耕地地力严重透支以及土壤污染加剧，这严重影响着我国耕地的可持续利用。2016 年，农业部等 10 部门联合发布《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》，将休耕制度提到了国家战略高度。休耕制度在我国是一项全新的制度安排，在确保国家粮食安全的基本原则下，科学推进耕地轮作休耕制度，是探索“藏粮于地、藏粮于技”的具体实施途径[24]。在重金属超标区进行的轮作休耕模式，主要有改种作物和品种、改良土壤、科学灌溉、控制吸收和“VIP+n”创新污染治理模式②。

然而，我国耕地资源紧张，粮食供给和粮食安全问题压力巨大，不宜对污染农田进行大面积的休耕。同时，治理性休耕制度需要完善相应的法律法规政策，需在技术支撑、资金保障、管理措施、效果评价等方面予以明确，这样才能确保休耕制度有效运转和规范实施[25]。

3.5 高重金属含量秸秆的处置

在农田生态系统中，作物秸秆还田是秸秆综合利用和增加土壤有机质的重要途径和措施。我国当前农作物秸秆年产生量达 6—7 亿吨，直接还田的比例占 35% 以上[26]。然而，在重金属污染农田上，作物秸秆中累积大量的重金属，秸秆还田在向土壤输入有机碳的同时，也把吸收的大部分重金属重新归还到土壤中。

因此，为了加强污染土壤的安全和可持续利用，需要结合当地产业发展，加强高重金属含量的作物秸秆处置和利用技术的研发，这对保障粮食安全生产具有重要的现实意义。

3.6 粮食安全生产保障体系与政策

保障粮食安全是一个复杂的系统工程。针对我国中轻度重金属污染农田特点，需要坚持预防为主、保护优先，管控为主、修复为辅，示范引导、因地制宜等原则，以发展实地检测监控技术为手段，以加强阻控修复技术支持为依托，形成由法律法规、标准体系、管理体制、公众参与、科学研究和宣传教育组成的农田土壤污染防治管理体系[27]③。

此外，还需尽快从制度约束、行政推动及政策扶持等方面考虑，构建土壤污染调查、风险评估、安全利用与修复等可操作的标准、规范和技术体系，保障我国农产品“从农田到餐桌”的全程质量安全。

② 黄国勤，赵其国．中国典型地区轮作休耕模式与发展策略．土壤学报，2017, DOI: 10.11766/trxb201708250387.
③ 陈卫平，谢天，杨阳，等．中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策．土壤学报，2017, DOI: 10.11766/trxb201710250485.

参考文献

1 路子显. 中国粮食重金属污染现状及防控对策. 粮食科技与经济, 2016, 41(6): 6-11, 53.

2 赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 452-458.

3 骆永明. 重金属污染土壤修复与管理研究. 中国科技成果, 2012, (20): 21-22.

4 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.

5 廖启林, 范迪富, 金洋, 等. 江苏农田土壤生态环境调查与评价. 江苏地质, 2006, 30(1): 32-40.

6 Liu X J, Tian G J, Jiang D, et al. Cadmium (Cd) distribution and contamination in Chinese paddy soils on national scale. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 17941-17952.

7 庄国泰. 我国土壤污染现状与防治策略. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 477-483.

8 Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies. Environmental Science & Technology, 2015, 49: 750-759.

9 Hu Y A, Cheng H F, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review. Environment International, 2016, 92-93: 515-532.

10 杭小帅, 周健民, 王火焰. 常熟市高风险区水稻籽粒重金属污染特征及评价. 中国环境科学, 2009, 29(2): 130-135.

11 陆美斌, 陈志军, 李为喜, 等. 中国两大优势产区小麦重金属镉含量调查与膳食暴露评估. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3866-3876.

12 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价. 生态学报, 2012, 32(11): 3487-3496.

13 强承魁, 秦越华, 曹丹, 等. 小麦富集重金属的品种差异及其潜在健康风险评价. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1-8.

14 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全. 土壤学报, 2010, 47(4): 628-638.

15 蒋彬, 张慧萍. 水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究. 云南师范大学学报, 2002, 22(3): 37-40.

16 Ding Y F, Chen Z, Zhu C. Microarray-based analysis of cadmium-responsive microRNAs in rice (*Oryza sativa*). Journal of Experimental Botany, 2011, 62(10): 3563-3573.

17 黄志熊, 王飞娟, 蒋晗, 等. 两个水稻品种镉积累相关基因表达及其分子调控机制. 作物学报, 2014, 40(4): 581-590.

18 瞿飞, 范成五, 刘桂华, 等. 钝化剂修复重金属污染土壤研究进展. 山西农业科学, 2017, 45(9): 1561-1565, 1576.

19 Cao X D, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. Bioresource Technology, 2010, 101: 5222-5228.

20 Meng J, Feng X L, Dai Z M, et al. Adsorption characteristics of Cu (II) from aqueous solution onto biochar derived from swine manure. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(11): 7035-7046.

21 钱翌, 褚兴飞. 纳米羟基磷灰石修复镉铅污染土壤的效果评价. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 176-179.

22 陈杰华, 王玉军, 王汉卫, 等. 基于TCLP法研究纳米羟基磷灰石对污染土壤重金属的固定. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 645-648.

23 王凯荣, 龚惠群, 王久荣. 栽培植物的耐镉性与镉污染土壤的农业利用. 农业环境保护, 2000, 19(4): 196-199.

24 赵其国, 滕应, 黄国勤. 中国探索实行耕地轮作休耕制度试点问题的战略思考. 生态环境学报, 2017, 26(1): 1-5.

25 陈展图, 杨庆媛. 中国耕地休耕制度基本构架构建. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(12): 126-136.

26 张福锁. 我国肥料产业与科学施肥战略研究报告. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 61-71.

27 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考. 土壤学报, 2013, 50(1): 186-194.

Control of Heavy Metal Pollution in Farmland of China in Terms of Food Security

XU Jianming* MENG Jun LIU Xingmei SHI Jiachun TANG Xianjin

(College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract The serious issue on heavy metal pollution in farmland of China has posed a potential threat to food security. On the basis of the current status of heavy metal pollution in farmland soils and grain in China, three categories of forbidden area, limited-yield area, and suitable yield area for agricultural producing areas should be emphasized. The application of crop varieties with low accumulation of heavy metals and passivation-barrier technology together with agricultural management could achieve the safe utilization of farmland with light-moderate heavy metal pollution. And this could definitely provide technical support for the safety of grain production of China and even the world. Furthermore, some key points and suggested strategies have also been proposed towards the safe utilization of farmland in China.

Keywords farmland, heavy metal pollution, food security, strategies



徐建明 浙江大学环境与资源学院教授，教育部长江学者特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者，国家自然科学基金创新研究群体负责人，国家级首批“新世纪百千万人才工程”，全国农业科研杰出人才，现代农业产业技术体系岗位科学家，国家环境保护专业技术领军人才，中国土壤学会副理事长。长期致力于土壤化学与生物化学、土壤污染控制与修复、环境质量与食物安全等领域的研究。发表SCI检索论文210篇，出版中、英文著作共7部。E-mail: jmxu@zju.edu.cn

XU Jianming Professor of the College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University. He is also a China Yangtz River Special Appointed Professor, Winner for the National Science Fund for Distinguish Young Scholars of China, Leader of Creative Research Group of National Natural Science Foundation of China, Winner for National Hundered-Thousand-Ten Thousand Talent Program in New Century of China, National Agricultural Research Outstanding Talents of China, Position Scientist in Technical Systems of China Modern Agriculture, National Environmental Protection Professional and Technical Leader of China, and Vice President of Soil Science Society of China. He has focused on research on soil chemistry and biochemistry, soil pollution and remediation, environmental quality and food safety for more than 30 years. So far he has published 210 papers in SCI journals and 7 books. E-mail: jmxu@zju.edu.cn

*Corresponding author